

# 汶川县城泥石流灾害风险评价研究<sup>\*</sup>

铁永波<sup>1,2</sup>, 唐 川<sup>2</sup>

(1. 成都地质矿产研究所, 四川 成都 610081;

2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 泥石流灾害是对我国西南山区城镇威胁最为严重的地质灾害之一。强震的作用则会诱发大量的滑坡和崩塌等不良地质体, 为泥石流的发生提供了必要的物源条件。为深入认识在强震和强降雨等极端事件下震区泥石流的危害特征及潜在风险, 以汶川 8.0 级地震强震区汶川县城后山南沟为例, 基于高分辨率 RS 影像和 GIS 技术, 通过开展危险性和易损性评价、指标分类及赋值、空间计算及叠加分析, 对该城区泥石流风险开展了实例研究, 并基于此探讨了强震区城镇泥石流灾害风险评价方法, 评价结果可为该城镇乃至西南强震区城镇泥石流灾害的防灾减灾规划提供参考和依据。

**关键词:** 西南强震区; 城镇泥石流; 风险评价; RS; GIS; 汶川县城

**中图分类号:** P642. 23      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2010)04-0043-05

2008 年 9 月 24 日, 仅距汶川 8.0 级大地震后短短 4 个月, 主震区北川县境内普降暴雨, 引发了区域性的泥石流灾害, 造成 40 余人死亡或失踪, 数千亩良田及房屋被冲毁, 北川老县城几乎全部被泥石流所淤埋, 致使县城多处地震遗址被破坏, 造成了不可估量的损失。这次震区暴发的泥石流灾害再次给人们敲响了警钟, 开展强震区城镇泥石流灾害风险评价及风险控制已迫在眉睫。

自 1990 年代以来, 受全球气候变暖的影响, 极端气象灾害事件引发的泥石流灾害逐渐成为制约山区城镇发展的突出问题, 受到各国和相关组织的关注<sup>[1-2]</sup>。1996 年 10 月 9 日, 联合国国际减灾十年委员会提出以“城市化与灾害”为主题的“国际减灾日”, 将城市灾害作为减灾的重中之重<sup>[3]</sup>。1993 年, 日本“国际减灾十年”国家委员会提出《发展中国家大城市灾害易损性评价的对比研究》报告, 以马尼拉、墨西哥城、惠灵顿和东京等大城市作为试点研究对象, 提出了较为系统的灾害风险分析及评价研究技术, 为城市灾害风险评价的理论及方法体系奠定了基础<sup>[4]</sup>; 美国地质勘探局(USGS)开展了特定区域城镇的风险评价研究工作, 并编制了区域性泥石流灾害风险评价图<sup>[5]</sup>; 法国政府开展了全国范围内泥石流调

查和风险评价研究, 绘制了全国 1:25 000 地质灾害风险图<sup>[6]</sup>。此外, 许多国家也开展了相应的山区城镇泥石流灾害风险防范计划, 如加拿大自然资源部提出的城市地质计划<sup>[7]</sup>、英国自然环境委员会的“城市改造与环境”计划<sup>[8]</sup>、美国和巴西若干城市的地质灾害调查与填图计划、澳大利亚的“城市社区地质灾害易损性”计划<sup>[9]</sup>, 及洛杉矶、东京、伦敦和莫斯科等城市的地下深部调查和填图项目等<sup>[10]</sup>。我国学者也开展了相应的研究, 在我国西部山区城镇泥石流灾害预警预报<sup>[11]</sup>、数值模拟<sup>[12]</sup>、易损性评价<sup>[13-15]</sup>、风险评价<sup>[16-17]</sup>、防灾减灾与应急响应<sup>[18-20]</sup>等方面开展了深入的研究, 形成了较为系统的风险评价方法与风险管理模式, 在国内城镇泥石流灾害风险评价研究中具有代表作用。

## 1 研究区概况

研究区位于四川盆地北部边缘, 居阿坝藏族羌族自治州东南部, 东邻彭州市、都江堰市, 南靠崇州市、大邑县、芦山县, 西接宝兴、小金县, 西北和东北分别与理县、茂县相连, 地理坐标为 30° 45' 37" ~ 31° 43' 10" N, 102° 51' 46" ~

\* 收稿日期: 2010-04-07

基金项目: 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)开放基金(GZ2009-09); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室研究基金资助

作者简介: 铁永波(1979-), 男, 云南大关人, 博士, 助理研究员, 主要从事环境地质和灾害地貌学方面研究. E-mail: tyb2009@qq.com

103°44'37"E。研究区属高原季风气候,气候干燥,降水量少而稳定,年降水量 526.3 mm,日最大降水量 79.9 mm。因季节分配不均,干雨季分明。降雨量主要集中 5—8 月,降水量为 324 mm,占年降水量 62.1%。区内气候总体特点是冬干夏湿,冬寒夏暖、雨热同季、日差较大、日照充足,年平均气温 8.2℃,气温自东南向西北并随海拔由低到高而相应降低。在高山峡谷地带,随着海拔高度变化,气候从亚热带到温带、寒温带、寒带,呈明显的垂直性差异。龙门山断裂带的后山断裂—茂汶断裂由县城邻近的东南侧通过,软弱的千枚岩地层广泛分布,地质环境较为脆弱。在汶川 8.0 级地震的影响下,汶川县城区共发现的地质灾害隐患点有 12 处,其中包括对县城构成潜在威胁的泥石流沟南沟。

南沟位于岷江左岸、汶川县城区东南侧后山,沟道直接穿过县城区,威胁到下游学校、政府机关、医院、宾馆、居民住宅及公路等,流域面积 6.8 km<sup>2</sup>,主沟长 5.6 km,流域相对高差 1 840 m,主沟纵比降约 330‰;主沟以“V”型为主,沟道常年有流水,水源补给主要为雪山融水;流域内基岩主要为花岗岩,混杂有变质后的板岩及少量千枚岩。通过实地调查发现,地震后南沟流域内发育了不同规模的滑坡 4 处、崩塌 9 处、不稳定斜坡及沟道两岸的坍塌堆积体,总规模约 110 000 m<sup>3</sup>。这些已经发生的滑坡及崩塌体在沟道内堆积,在流水的作用下极易启动,同时,沟道两侧坡体上还有多处不稳定斜坡,在地震作用下已极不稳定,一旦在降雨作用下,很容易滑落到沟道内,成为泥石流发生的物源。总体上看,该沟具备了泥石流发生的物源条件和地形地貌条件,在暴雨作用下极易发生泥石流(图 1)。



图 1 汶川县城区遥感影像图

## 2 强震区城镇泥石流灾害风险评价的主要内容与方法

研究的资料主要来源于:①汶川 8.0 级地震后国土资源部于 2008 年 5 月 18 日完成的汶川县航空拍摄照片,该航片分辨率为 0.5 m;②汶川县 1:5 万地形图数据、1:5 万 DEM 和 1:10 万地质图;③对泥石流沟开展现场调查获取的流域特征资料。风险评价主要通过对应用高分辨率遥感影像对承灾体进行解译后,分别得到危险性评价结果和易损性评价结果,最后在 GIS 平台下将泥石流危险性和易损性进行量化赋值并进行空间叠加分析和计算,从而实现风险评价及分区。

### 2.1 泥石流危险性评价

泥石流危险性的本质是泥石流发生的可能性(或发生的概率)及其可能的危险范围,往往是相对特定的频率而言。通常情况下,泥石流危险性评价往往通过危险性分区体现。国际通用的方法是借鉴瑞士早期绘制雪崩危险图的方法,即用不同的颜色表示灾害危险程度的不同<sup>[21-22]</sup>。但迄今为止对危险区等级划分并无统一的标准。如奥地利采用二级区划(划分为红色区和黄色区)<sup>[23]</sup>;瑞士采用三级区划(划分为红色区、蓝色区、黄色区)的方法来划分泥石流危险区<sup>[24]</sup>;我国学者的二级区划(划分为红色区和黄色区<sup>[25]</sup>)、四级区划(极危险区、高危险区、中危险区和低危险区)等标准<sup>[26]</sup>。根据以上分析,本文主要采用泥石流堆积区地形地貌特征和危险性三级划分的方法来表示泥石流的危险性,这里主要考虑两个因素:堆积区的坡度和距离主沟的水平距离。

(1)堆积区坡度。通常情况下,当泥石流沟道在沟口坡度小于 10°时,便开始发生堆积,即坡度小于 10°的地区是泥石流危险性相对最高的区域<sup>[27-28]</sup>。这一特征与 2008 年 9 月 24 日北川暴雨泥石流的发生具有较好的吻合性。为此,将堆积区坡度对应分为 3 个危险级别的值,并在 GIS 平台下进行相应的赋值与打分,其标准为:坡度介于 0°~10°之间为高危险区,相应的赋值为 5;坡度介于 10°~15°之间为中危险区,相应的赋值为 3;坡度介于 15°~20°之间为低危险区,相应的赋值为 2(表 1)。

表 1 泥石流危险性分区与堆积扇坡度对应关系表

泥石流危险性分级	高	中	低
堆积区坡度	< 10°	10° ~ 15°	> 15°
赋值打分	5	3	2

(2)距主沟的水平距离。距离主沟道越近,泥石流的危险性越高,反之则危险性越低,危险性最高的是距泥石流主沟道 100 m 以内的区域<sup>[29]</sup>。通过对汶川 8.0 级地震后北川县暴雨泥石流的调查发现,泥石流发生堆积的区域均介于距主沟两侧 200 m 的范围之内。为此,根据泥石流危险性的三级划分标准,对应将距主沟水平距离划分为三级,并在 GIS 平台下通过缓冲区分析分别赋予相应的值:距主沟道距离 < 100 m 为泥石流高危险区,赋值为 5;距主沟道距离介于 100 ~ 200 m 之间为中危险区,赋值为 3;距主沟道距离 > 200 m 为低危险区,赋值为 2(表 2)。最后,将以上两个划分标准在 GIS 支持下进行空间叠加计算和分析,得到泥石流危险性分区图。

表 2 距泥石流主沟水平距离与危险性分级对应表

距离主沟距离/m	≤100	100 ~ 200	200 ~ 300
危险性分级	高	中	低
赋值打分	5	3	2

2.2 泥石流易损性评价

易损性(Vulnerability)这一术语与风险的理解较为接近,并被应用到许多风险和灾害管理中。由于易损性通常与自然风险的结果密切相关,其定义是抽象的,难以直观地进行表达,因此,对其定义也有不同的理解<sup>[30]</sup>。1991 年和 1992 年联合国两次公布了自然灾害易损度的定义:“在给定的地区由于潜在损害现象可能造成的损失程度”,并将其表现形式进行了量化定义,即易损性的取值范围介于 0 ~ 1 之间<sup>[31]</sup>。

易损性评价主要通过高分辨率遥感影像资料,对遭受泥石流灾害威胁的承灾体进行解译,承灾体主要分为人口、建筑、道路、生命线设施及农业用地五大类。①各类承灾体的解译与赋值:人口分布特征的解译主要根据遥感解译,结合实地调查结果,对房屋建筑的使用类型(民房、工厂或学校等)来确定人口的活动区域,并勾划出对应的边界,采用格栅化的形式对研究区进行划分,网格的大小为 100 m × 100 m,将格栅化后的图层和解译的居民房屋进行叠加,对网格内居民房屋建筑面积的大小来确定人口分布密度的大小,用人口密度的方式得到人口密度分布图,并赋予相应

的值(高密度区赋值为 5,中密度区赋值为 3,低密度区赋值为 2);房屋建筑特征的解译主要通过遥感影像和实地调查确定房屋的结构特征,并根据不同房屋类型易损性的差异进行赋值(框架结构赋值为 5,砖木结构赋值为 3,土木结构赋值为 2),同理,其它承灾体的解译和赋值也以此类推;②空间叠加分析:将各类承灾体的解译结果在 GIS 下进行空间叠加分析,根据赋值相加得到的结果确定出综合的易损性分区图(高、中、低)。

2.3 风险评价

虽然多数研究都将风险看作是对人类和生存环境构成影响的事件,但对风险评价的定义和解释,不同学者的理解均有差异。1992 年联合国人道主义事务部(Department of Humanitarian Affairs)提出了自然灾害风险的统一定义:“风险是在特定区域和特定时间段内由某一自然灾害而造成的生命财产及经济活动可能的损失”,并提出了风险度( $R$ )是危险度( $H$ )和易损度( $V$ )的乘积,这一定义一直沿用至今<sup>[32]</sup>。这里所采用的风险评价方法也主要采用该计算公式。文中的风险评价主要在 GIS 支持下完成,即根据危险性和易损性的分区赋值结果,再进行空间叠加计算,得到相应的计算值,通过将不同计算值区间分别用红色、黄色和绿色表示高风险区、中风险区和低风险区。最后,将风险评价图与遥感影像进行叠加,可以很直观地从遥感影像上分辨出不同风险区内承灾体的空间分布特征。

3 汶川县城泥石流灾害风险评价

以汶川县城后山南沟为例,开展了基于高分辨率遥感影像和 GIS 技术的强震区城镇泥石流灾害风险评价研究。首先通过堆积区坡度分区,确定坡度小于 10°的区域,同时通过缓冲区分析,分别得到距离主沟小于 100 m、100 ~ 150 m 和 150 ~ 200 m 三个分级,分别用不同的颜色(红、黄、绿)表示高、中、低三个危险性级别,并分别赋值为 5、3、2,而后得到危险性分区图(图 2a);然后通过对承灾体(人口、房屋、道路等)的遥感解译,按照前文中易损性分级与赋值的方法,也用不同颜色(红、黄、绿)分别表示高、中、低三个易损性级别,通过相应赋值 5、3、2 后,得到易损性分区图(图 2b、图 2c);最后在 GIS 的空间计算和分析功能下,将危险性图层和易损性图层进行叠加计算,最终得到风险评价图(图 2d)。

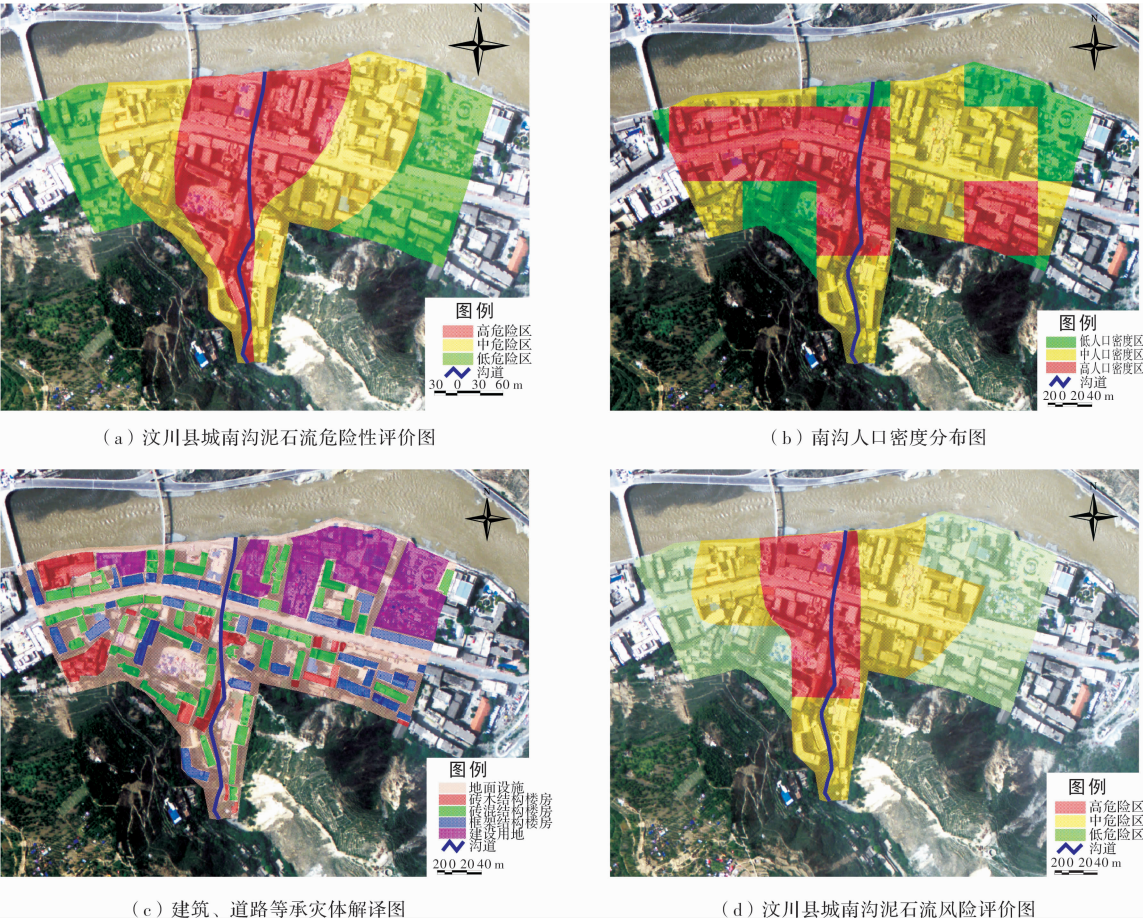


图2 汶川县城南沟泥石流风险评价图

根据南沟泥石流灾害风险分区的面积统计结果显示，高风险区面积约 0.06 km<sup>2</sup>，占总面积的 24%；中风险区面积约 0.09 km<sup>2</sup>，占总面积的 37%；低风险区面积约 0.1 km<sup>2</sup>，占总面积的 39%（图 2）。从不同风险区内承灾体的数量统计上看，高风险区内房屋面积约占该区总面积的 73%，建设用地面积占 1%，公路占 26%；中风险区内房屋面积约占该区总面积的 66%，建设用地面积占 8%，公路占 26%；低风险区内房屋面积约占该区总面积的 63%，建设用地面积占 15%，公路占 22%（表 3）。

表3 南沟泥石流不同风险区内承灾体数量统计表 m<sup>2</sup>

承灾体分类	风险分区			分类合计
	高风险区	中风险区	低风险区	
房屋面积	46 200	64 400	63 400	174 000
建设用地面积	760	7 300	15 200	23 300
公路设施面积	16 700	25 300	22 300	64 300

针对以上评价结果，在汶川县城泥石流灾害风险控制和防灾减灾规划过程中，需要优先考虑对高风险区和中风险区采取有效的减灾措施，如开展工程防治措施、预警预报措施、应急演练等，

以降低泥石流可能造成的危害；对于泥石流低风险区，则可通过群策群防、应急演练等方式降低泥石流潜在的危害。

4 结论

在我国，泥石流对城镇的危害在山区随处可见，尤其是在受地质构造运动影响强烈的山区更为明显。为引起人们对山区城镇泥石流灾害威胁的关注，有效减轻泥石流可能造成的损失，本文以汶川 8.0 级地震强震区之一的汶川县为例，通过应用高分辨率遥感影像和 GIS 技术，开展了强震区城镇泥石流灾害风险评价与实例研究，主要得到以下结论。

（1）受西南强震区的控制，泥石流灾害活动较为频繁，汶川 8.0 地震后北川县境内爆发的区域性暴雨泥石流表明，该强震区泥石流已进入一个新的活跃期，泥石流在未来很长一段时间内将会对强震区内的山区城镇和村庄等高载体密度区造成潜在威胁，开展强震区城镇泥石流灾害风险评价方法对防灾减灾具有较强的现实意义。



(2) 由于泥石流自身的一些不确定性因素导致对其评价具有较大的难度, 加之城镇这一复杂的承载体, 使得城镇泥石流风险评价设计的内容较多, 难以采用传统的评价方法开展有效评价。应用高分辨率遥感和 GIS 技术能在很大程度上提高风险评价的效率和精度, 尤其是在风险分区上具有很直观的效果, 能为城镇的防灾减灾提供科学的依据。

(3) 通过对汶川县城南沟泥石流开展风险评价研究发现, 虽然泥石流沟的中、低风险区的面积超过了总风险区面积的 70%, 而高风险区面积不到总面积的 30%, 但从各区承灾体的分布情况看, 房屋面积、人口数量及其它承灾体的比例却占了总数的 50% 以上, 由此可以看出, 高、中风险区的界定受承灾体的分布特征(人口密度和房屋建筑密度)影响较大; 低风险区的界定则主要受危险性因素的控制, 在风险控制中需根据不同风险区制订相应的措施。

(4) 由于受山区城镇承灾体分布特征及类型的影响, 在应用遥感影像对承载体进行解译时, 需要针对承载体的具体特征进行取舍, 如生命线设施中只有公路能很好识别, 其它的如电线杆、水管道的分布特征无法在遥感影像上进行解译。虽然这些参数可以通过结合现场调查进行分析, 但在实际易损性评价中, 这些承灾体的存在对易损性的影响几乎可以忽略。

(5) 根据评价结果, 可为汶川县城南沟泥石流灾害风险控制及防灾减灾规划提供合理的依据。同时, 该评价方法可作为我国西南强震区城镇泥石流灾害风险评价的一个探索, 为我国西南强震区城镇风险控制提供决策依据。

## 参考文献:

- [1] Chau K T, Lo K H. Hazard assessment of debris flows for Leung King Estate of Hong Kong by incorporating GIS with numerical simulations [J]. NHESS, 2004, 4: 103–116.
- [2] Marcel Hürlimann, Ramon Copons, Joan Altimir. Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach [J]. Geomorphology, 2006, 78: 359–372.
- [3] Petrascheck A, Kienholz H. Hazard assessment and mapping of mountain risks in Switzerland [J]. Geotech. J., 2004, 42: 101–107.
- [4] Adam B Prochaska, Paul M Santi, Jerry D Higgins, et al. Debrisflow runoff predictions based on the average channel slope (ACS) [J]. Engineering Geology, 2008, 98: 29–40.
- [5] Antonucci A, Salvetti A, Zaffalon M. Hazard assessment of debris flows by credal networks [J]. Natural Hazards, 2000, 43: 173–181.
- [6] Smith K. Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster [M]. London: Routledge, 1996: 12–38.
- [7] Burby R J. Cooperating with nature: confronting natural hazard with land use planning [M]. Washington, DC: Joseph Henry Press, 1998.
- [8] Van C J. Westen Geo – Information tools for landslide risk assessment. An overview of recent developments [J]. Surveys in Geophysics, 2005, 21(2/3): 241–255.
- [9] Calvo F Napoletano, Savi F. Debris flow risk assessment: a case study [J]. Geophysical Research Abstracts, 2006, 18: 341–347.
- [10] Conversini D Salciarini, Felicioni G. The debris flow hazard in the Lagarelle Creek in the eastern Umbria region, central Italy [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005 (5): 275–283.
- [11] 张春山, 吴满路, 张业成. 地质灾害风险评价方法及展望 [J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 96–102.
- [12] 丁继新, 杨志法, 尚彦军, 等. 区域泥石流灾害的定量风险分析 [J]. 岩石力学, 2006, 27(7): 71–76.
- [13] 刘希林, 莫多闻. 泥石流易损度评价 [J]. 地理研究, 2002, 21(5): 569–577.
- [14] 赵源, 刘希林. 泥石流灾害损失评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 42–47.
- [15] 张梁, 张业成. 地质灾害经济损失评价方法研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 11(12): 95–102.
- [16] 刘希林. 泥石流风险区划研究 [J]. 地质力学学报, 2000, 6(4): 37–42.
- [17] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险评价 [M]. 成都: 四川科技出版社, 2002.
- [18] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [19] 铁永波, 唐川. 山区城镇泥石流灾害风险控制模式探讨 [J]. 灾害学, 2008, 23(3): 10–14.
- [20] 杜榕桓, 李德基, 祁龙. 我国山区城镇泥石流减灾特点与防御对策研究 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1992.
- [21] Takahashi T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones; soft countermeasures for a disaster [J]. Natural Disaster Science, 1981(3): 57–89.
- [22] Chang Tung – Chiung. Risk degree of debris flow applying neural networks [J]. Nat Hazards, 2007, 42: 209–224.
- [23] Blaikie P, Cannon T. Risk: Natural hazards, peoples vulnerability and disasters [M]. London: Geological Issue Press, 1994.
- [24] Weichselgartner J. Disaster mitigation; the concept of vulnerability revisited [J]. Disaster Prevention and Management, 2001, 10: 85–94.
- [25] 王礼先. 北京山区荒漠溪分类与危险区制图 [J]. 山地研究, 1995, 13(3): 141–146.
- [26] 唐川, 刘希林, 朱静. 泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用 [J]. 自然灾害学报, 1993, 2(4): 79–84.
- [27] Dwain Boyer. Risk assessment procedure for proposed resource development activities above alluvial and debris torrent fans [R]. 2004.
- [28] 刘希林. 泥石流地貌标志的初步探讨 [J]. 灾害学, 1987(4): 27–32.
- [29] 唐川, 刘洪江. 泥石流堆积扇危险度分区定量评价研究 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(3): 63–70.
- [30] Wisner B. Assessment of capability and vulnerability [C]// Bankoff G, Frerks G, Hilhorst D. Mapping vulnerability. London: Earthscan, 2004: 183–193.
- [31] UNDRP. Mitigation natural disasters: phenomena, effects, and options. A manual for policy makers and planners [R]. Office of the United Nations Disaster Relief Co – coordinator, Geneva, 1991.
- [32] Fell C. Landslide risk assessment [J]. Rotterdam: A. A Balkema, 1997: 25–50.